

严酷环境下混凝土结构的 耐久性设计

**DURABILITY DESIGN
OF CONCRETE STRUCTURES
IN SEVERE ENVIRONMENTS**

【挪威】Odd E.Gjørv 著
赵铁军 译



Taylor & Francis
Taylor & Francis Group

中国建材工业出版社

Durability Design of Concrete Structures
in Severe Environments

严酷环境下混凝土结构的 耐久性设计

[挪威] Odd E. Gjrv 著
赵铁军 译

中国建材工业出版社

前 言

严酷环境下的混凝土结构，可能包括各种环境条件下不同的混凝土结构形式。实际上，除了那些暴露于除冰盐侵蚀环境下的重要混凝土结构外，大多数严酷环境下的混凝土结构都与海洋环境有关。就地球的总表面积而言，大约 70% 为海水，即海水面积大约为陆地面积的 2.5 倍。考虑到这些陆地面积中适于人类居住的面积只占小部分以及人口密度不断增长，我们有理由相信，不久的将来人类的活动领域向海水和海洋环境方向发展的需求将不断增加。这种日益增长的需求可以通过如下几个关键词反映出来：原材料、能源、交通和空间等。

早在 20 世纪 70 年代，美国混凝土学会就对未来混凝土的应用进行了技术预测，其中提到了大陆架的快速开发。在该预测报告中，不仅探讨了与海洋石油和天然气开采等有关的人类活动和结构形式，而且涉及了减轻陆地拥挤的有关情况。为应对这一发展，1972 年 FIP（预应力混凝土国际联合会）在提比利斯（Tbilisi）组织召开了一次关于海洋混凝土结构的国际会议，会上研讨了大量的新技术与措施。毋庸置疑，作为未来海洋环境中人类活动的基础，大量的混凝土结构将发挥越来越重要的作用。这些结构形式种类繁多，诸如：

- 无锚固的自由漂浮结构，如船、游艇、海面漂浮箱等；
- 浮在水平面上的锚固结构，如桥、操作平台、泊位、发电厂、机场、城市等；
- 落在海床上的锚固结构（主动浮力），如隧道、仓库等；
- 落在海床之上或之下的底部支撑结构（被动浮力），如桥梁、港口结构、隧道、房屋、仓库、沉箱、操作平台、发电厂等。

上述这些结构的快速发展在很大程度上已经发生，并将在未来许多年中继续扩展下去。混凝土材料将是相对廉价、容易制备的大宗建筑材料。众所周知，混凝土材料的性能可在较大范围内变化，必要时，根据材料浮力和结构的要求，混凝土密度可在 $500 \sim 4500 \text{ kg/m}^3$ 范围调整，同时抗压强度可达 100MPa 以上。实践也表明，如果能合理利用现有知识和经验，严酷环境下的混凝土结构可以服役相当长的时间。

然而，大量工程实践表明，对于新建混凝土结构来说，施工质量的离散性总是较高而且不断变化；在严酷环境中，不管组成材料怎样，混凝土结构的弱点很快会暴露出来。因此，基于概率方法的耐久性设计非常重要。由于当前大多数的耐久性问题也可能与疏于适当质量控制以及混凝土施工过程中的特殊问题有关，所以，要获得更为可控的耐久性设计方法，必须严格控制施工质量和变异性。在混凝土施工过程中，基于性能的混凝土质量控制（附有目标施工质量的文件）也非常重要。

长久以来，严酷环境下的混凝土结构修复和重建耗费了大量的资金和自然资源，其破坏的主要原因是混凝土钢筋的过早锈蚀。因此，近年来更为先进的耐久性设计方法和施工过程中的混凝土质量控制技术发展很快，本书概括并讨论了一些案例。

近年来，越来越多的业主已经认识到，为了实现混凝土结构耐久性的提高与可控，与其不断增加后期对结构的维护和修复费用，不如在结构建设过程中追加较小花费，这是非常合算的投资。

由于在建的重要混凝土结构的数量迅速增加，延长和控制混凝土结构的耐久性不仅是一个技术和经济问题，而且是一个非常重要且越来越重要的环境和可持续发展问题。本书对此也进行了阐述和讨论。

就本书作者在严酷环境下新建混凝土结构耐久性的改善和控制方面取得的成绩，在此要感谢近年来我的一些博士研究生，他们在混凝土结构耐久性的各个方面做了大量工作，并在混凝土质量控制和耐久性设计的各项工作中做出了贡献，本书对此都有涉及。这些博士研究生包括：Tiewei Zhang, Olaf Lahus, Arne Gussiås, Franz Pruckner, Surafel Ketema Desta, Miguel Ferreira, Öskan Sengul, Guofei Liu, 以及 Vemund Årskog。

同时，作者也非常感谢挪威海岸总管 Roar Johansen 先生和挪威港口工程师协会的 Tore Lundestad 先生，感谢他们近年来出色的合作与研究，感谢他们怀着极大的热情和勇气，努力将混凝土结构中的新知识应用于挪威港口建设。有机会出版 Oslo Harbour KF 和 Nye Tjuvholmen KS 的混凝土耐久性设计和质量控制方面的成果和经验，作者感到由衷地高兴。

Odd E. GjØrv

2008 年 6 月于特隆赫姆市

译 序

今年年初,由于课题研究需要,感觉有必要在国际范围内进行一次全面的相关资料收集。考虑到有些国际会议论文集和外文出版的书籍不易查找,特请 Wittmann 院士和张新华教授帮忙,结果收获颇丰。尤其应该指出的是,张新华教授 2 月份来中国,给我们带来了大量资料,并告之有一本新的专著,将于两周后出版发行,请 Wittmann 院士 3 月来青岛时再带来。3 月份, Wittmann 院士果然带来了这本新书,书名为《Durability Design of Concrete Structures in Severe Environments》(《严酷环境下混凝土结构的耐久性设计》),作者为挪威的 Odd E. Gjrv 教授。

Odd E. Gjrv 教授从事该方面的研究较早,并持续至今。早在 20~30 年前,他就发表了大量文章,有些我研读过,印象比较深刻。他以实验研究为主,并重视现场试验与实践。他的许多研究成果已被挪威及其他国家的标准、规范及指南所采用。

该书针对目前土木工程界的热点和难点问题进行了系统和全面的阐述,学术水平高,实用性强,是目前难得的一本好书籍。当我翻看这本著作的时候,突然萌生了将该书译成中文并出版的念头。经与 Odd E. Gjrv 教授联系,他欣然应许。对此,我心存感激。同时感到,该书的翻译出版会大大方便国内的读者。

感谢 Wittmann 院士和张新华教授帮我购得该书;感谢东南大学孙伟院士和 Wittmann 院士的鼓励和推荐;感谢研究生万小梅、苏卿、曹卫群、张鹏、胡春红、王鹏刚、张连水、巴光忠、王飞、姜蓉、崔玲、王丽静、王龙军等参与翻译和校对;感谢在研课题——国家自然科学基金重点项目(50739001)和教育部博士点基金项目(20070429001)的支持。

由于译者的专业和英语水平有限,难免有疏漏和不当之处,敬请读者批评指正。

赵铁军

2009 年 10 月于青岛

Folker H. Wittmann 院士推荐信

背 景

如今，海洋环境和类似的恶劣环境中的钢筋混凝土结构越来越多，包括海底隧道、沿海岸或跨越海湾的大跨度桥梁、港口、海岸及近海工程结构等。这些结构的建造和维修费用在国家 GDP 中占有很大比重，采取措施降低这部分费用显得十分迫切。例如，在桥梁和海底隧道的总成本中存在既相互独立又紧密关联的两部分：初始建造成本和后期维护成本。目前，大量理论和实际经验都表明，如果早期考虑到提高钢筋混凝土结构长期耐久性的附加措施，那么附加建设成本较小，又能显著降低结构服役期内的维护和修复费用，从而大大降低结构总成本。

当前，由于支付不起昂贵的维修费用，许多国家的基础设施已经处于无法全面运营状态。从新闻报道中了解到，越来越多的桥梁因严重的耐久性破坏而发生坍塌。我们知道，传统的土木工程结构是按照结构受荷安全性和稳定性进行设计的。有人认为，混凝土结构的耐久性完全可以通过控制一些设计参数来实现。但是，鉴于目前全球范围内令人震惊的耐久性破坏现实，有必要对钢筋混凝土结构进行严格的耐久性设计。

工程师们必须到大学里接受培训，这样他们才能够对处于严酷环境中的混凝土结构进行可靠的耐久性设计。在此背景下，非常需要出版一本优秀的关于这方面的教科书，同时也需要了解这一复杂领域的国际研究进展。

作者简介

作者 Odd E. GjØrv 是挪威科技大学 (NTNU) 结构工程系的一名教授。挪威科技大学位于特隆赫姆市，Odd E. GjØrv 教授已在该大学任教约 30 年。现在，他在校仍担任名誉教授。多年来，他在挪威科技大学领导着一支由博士和硕士组成的研究团队，该团队的主要工作是研究海洋环境下的钢筋混凝土结构耐久性。

Odd E. GjØrv 教授已经在他的研究领域与其他国家的优秀科学家和工程师建立了广泛的国际合作。他深入参与了一些国际专业协会，如 ACI (美国混凝土学会)、FIP (预应力混凝土国际联合会) 和 RILEM (建筑材料和结构物

测试与研究实验室国际学会)。此外,长期以来他还参与了北海海上石油和天然气勘探海洋平台的建设。

Odd E. Gjrv 教授是一位专门从事混凝土结构耐久性的结构工程师。这意味着他熟知钢筋和水泥基材料的劣化过程,并且也深知如何使用这些知识对实际结构进行耐久性设计。

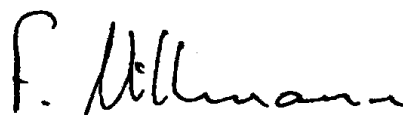
著作简介

在 Odd E. Gjrv 教授的这本关于严酷环境下混凝土结构耐久性设计的著作中,首先进行了历史回顾;随后对混凝土结构的实际性能进行了描述,这些结构包括港口结构、桥梁结构、海洋结构和其他结构;然后详细讨论了水泥基材料中的钢筋锈蚀及其劣化过程。在第五章中作者还描述了海洋混凝土结构和陆地混凝土结构的耐久性要求;然后用概率理论对钢筋锈蚀问题进行了分析,这一点特别重要,因为结构的服役寿命预测永远不可能是确定性的,所以概率方法是唯一可行的方法;随后详细讲解了钢筋的防护策略和措施,如阴极保护和表面防护等。在第十章中,探讨了如何控制氯离子向已有结构中的渗透,介绍了用于提高混凝土耐久性的防护措施。在前述基本理论基础上,作者挑选了三个实际工程对结构耐久性设计进行了详细说明;最后讨论了钢筋混凝土结构全寿命成本问题以及服役寿命的评估问题。在这本书的最后部分附加了大量用于深入研究的参考文献和更详细的资料信息。

推 荐

基于对年轻工程师进行混凝土结构耐久性设计再教育的需要,以及为相关从业者和主管部门深入学习提供全面的教科书的需要,我建议并非常希望将 Odd E. Gjrv 教授的这本著作翻译成中文,以飨中国读者。

目前,在知识领域仍然存在巨大的语言障碍。本书中文译本的出版将会大大加速这一特殊领域的知识传播。也正是因为这本书面向实际的混凝土工程,它同时也将作为采用概率论进行耐久性设计在中国发展的基础。鉴于此,本著作的中文翻译版是非常急需的。



2009 年 6 月

目 录

第1章 历史回顾	1
第2章 现场性能	12
2.1 概述	12
2.2 港口结构	13
2.3 桥梁结构	33
2.4 海洋结构	43
2.5 其他结构	49
第3章 混凝土中的钢筋锈蚀	51
3.1 概述	51
3.2 氯离子渗透	51
3.3 钢筋的钝化	59
3.4 锈蚀速度	61
3.4.1 概述	61
3.4.2 电阻率	61
3.4.3 氧量	63
3.5 裂缝	65
3.6 自由暴露钢材与内埋钢筋之间的电偶	67
第4章 其他劣化过程	68
4.1 概述	68
4.2 冻融破坏	69
4.3 碱-骨料反应	70

第5章 标准与实施细则	73
5.1 概述	73
5.2 海洋混凝土结构的耐久性要求	73
5.3 陆上混凝土结构的耐久性要求	75
第6章 钢筋锈蚀概率	79
6.1 概述	79
6.2 氯离子渗透计算	81
6.3 概率计算	81
6.4 锈蚀概率计算	82
6.5 输入参数	83
6.5.1 概述	83
6.5.2 环境荷载	84
6.5.3 混凝土质量	87
6.5.4 混凝土保护层厚度	92
6.6 耐久性分析	92
6.6.1 概况	92
6.6.2 氯离子扩散性的影响	93
6.6.3 混凝土保护层的作用	95
6.7 结果评价与讨论	96
第7章 附加防护措施	98
7.1 概述	98
7.2 不锈钢钢筋	98
7.3 阴极保护	101
7.4 非金属筋	103
7.5 阻锈剂	104
7.6 混凝土表面防护	104
7.7 预制结构构件	108
第8章 混凝土质量控制	111
8.1 概述	111
8.2 氯离子扩散系数	112

8.2.1	概述	112
8.2.2	试验试块	114
8.2.3	试验步骤	114
8.2.4	结果评价	116
8.3	电阻率	116
8.3.1	概述	116
8.3.2	试验步骤	118
8.3.3	测量结果评价	120
8.4	混凝土保护层	120
8.5	电连通性	121
8.5.1	概述	121
8.5.2	试验步骤	122
第9章	施工质量	123
9.1	概述	123
9.2	符合规定的耐久性	123
9.3	施工现场混凝土的耐久性	124
9.4	潜在耐久性	125
第10章	状态评估与防护	126
10.1	概述	126
10.2	氯离子渗透控制	126
10.3	锈蚀概率预测	129
10.4	防护措施	130
第11章	应用实例	131
11.1	概述	131
11.2	Nye Filipstadkaia, 奥斯陆(2002)	132
11.2.1	测得的耐久性	132
11.2.2	施工现场混凝土的耐久性	134
11.2.3	潜在耐久性	134
11.3	新的集装箱港, 奥斯陆(2007)	134
11.3.1	耐久性规定	135
11.3.2	符合规定的耐久性	136

11.3.3	施工现场混凝土的耐久性	139
11.3.4	潜在耐久性	140
11.4	Nye Tjuvholmen, 奥斯陆(2005)	140
11.4.1	规定的耐久性	141
11.4.2	符合规定的耐久性	142
11.4.3	施工现场混凝土的耐久性	144
11.4.4	潜在耐久性	145
11.5	结果评价与讨论	145
第12章	全寿命周期成本	147
12.1	概述	147
12.2	案例研究	148
12.2.1	不采取任何措施	150
12.2.2	提高混凝土强度	150
12.2.3	增加混凝土保护层厚度	150
12.2.4	同时提高混凝土强度和混凝土保护层厚度	150
12.2.5	使用部分不锈钢钢筋(75%)	151
12.2.6	全部采用不锈钢钢筋(100%)	151
12.2.7	阴极保护	151
12.3	结果评价与讨论	151
第13章	全寿命周期评价	153
13.1	概述	153
13.2	全寿命周期评价框架	155
13.3	案例分析	156
13.3.1	概述	156
13.3.2	小面积修补	157
13.3.3	混凝土表面憎水防护处理	157
13.4	结果评价与讨论	158
第14章	推荐的施工规程	160
14.1	概述	160
14.2	施工规程	161
14.2.1	钢筋锈蚀概率	161

14.2.2 附加措施和防护方法 161

14.2.3 施工质量 161

14.2.4 状态评估和预防性维护 162

参考文献 163

第1章 历史回顾

1756 ~ 1759 年间, Smeaton 在英吉利海峡出口处的埃迪斯通岩石上建造了著名的灯塔 (Smeaton, 1791), 此工程中首次使用了为适应恶劣的海洋环境而专门开发的水泥 (Lea, 1970)。1877 年, 由于基岩的严重腐蚀而被迫拆除时, 这个灯塔已经完好无损地屹立了 100 多年。自从 Smeaton 报道自己建造这座灯塔 (图 1.1) 的经验以来, 有关海洋环境中服役混凝土的大量文献已成为漫长的混凝土技术史中引人入胜的篇章。在过去的 150 年间, 许多专业人士、委员会和国家有关部门都曾从事这一课题的研究, 并在国际会议上发表了大量学术论文, 诸如国际材料试验联合会于 1909 年在哥本哈根、1912 年在纽约以及 1927 年在阿姆斯特丹组织召开了三届国际会议; 国际航运协会 (PIANC) 于 1923 年在伦敦、1926 年在开罗、1931 年在威尼斯以及 1949 年在里斯本召开了多次国际会议; 建筑材料和结构物测试与研究实验室国际学会 (RILEM) 于 1961 年和 1969 年在布拉格举行了国际会议; PIANC-RILEM 于 1965 年在巴勒莫组织了国际会议; 预应力混凝土国际联合会 (FIP) 于 1972 年在提比利斯也举行了国际会议。据 Atwood and Johnson (1924) 统计, 截至 1923 年这方面的相关文献已有 3000 余篇, 并且针对海洋环境下混凝土结构的耐久性研究还将继续成为课题研究和国际会议的主题 (Malhotra, 1980、1988、1996; Mehta, 1989、1996; Sakai *et al.*, 1995; Gjorv *et al.*, 1998; Banthia *et al.*, 2001; Oh *et al.*, 2004; Toutlemonde *et al.*, 2007)。

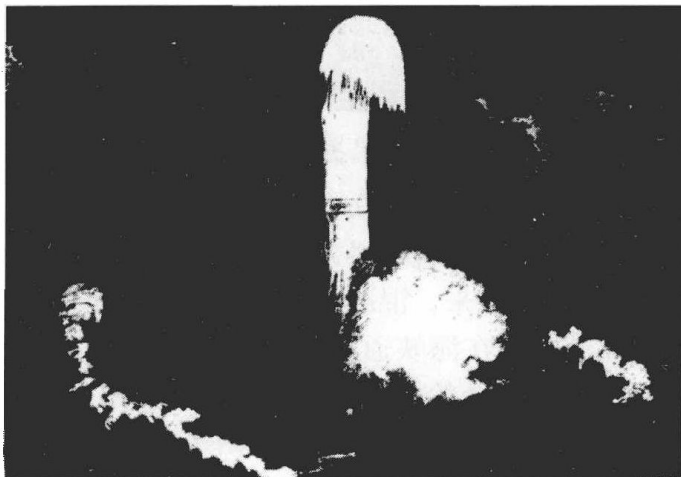


图 1.1 John Smeaton 于 1791 年报道的埃迪斯通灯塔 (来源: 大英博物馆)

在服役期间,混凝土结构常常遭受冻融破坏、碱-骨料反应和化学侵蚀等劣化作用。但事实证明,这些作用并不是导致混凝土性能劣化的最主要原因,混凝土耐久性和长期性能的最大威胁来自于混凝土内钢筋的电化学腐蚀(Gjørsv, 1968、1975、1989、2002)。这在大量文献中已经得到验证,并且 Wig and Ferguson (1917) 对美国海域的混凝土结构进行全面调查的结果也证实了这一点。

除了桥梁和港口结构等传统的混凝土结构外,钢筋混凝土和预应力混凝土已被越来越多地用于建造非常重要的海洋结构和仓储结构。早在 20 世纪 70 年代初期,美国混凝土学会发布的技术预测报告中就预见了这一发展趋势(ACI, 1972)。该报告指出,混凝土在海洋工程,尤其是海洋石油和天然气勘探工程中的应用将具有巨大的潜力。

迄今为止,挪威已建造了大量的海洋混凝土结构,在海洋环境下的混凝土应用方面具有悠久的历史。20 世纪初期,在修建美国与加拿大之间的底特律河隧道时,两位挪威工程师 Gundersen 和 Hoff 开发并申请了用于水下混凝土浇注的“导管法”专利(Gjørsv, 1968)。从 1910 年 Gundersen 回到挪威并成为 AS Høyer-Ellefsen 公司的董事长以来,他提出的“导管法”也成为了挪威海岸线上新一代码头和港口结构建造的基本方法(Gjørsv, 1968, 1970)。这些结构通常是由一个位于柱顶的开放式钢筋混凝土桥面和位于水下的钢筋混凝土柱组成。尽管水下混凝土柱已逐渐被钢管混凝土所取代,但是这种开放式混凝土结构仍然是挪威沿海最普遍的港口结构形式(图 1.2)。



图 1.2 开放式混凝土结构仍然是挪威沿岸港口结构中最普遍的形式

由于海岸线漫长,且其间分布着众多的峡湾和大量有人居住的岛屿,因此挪威在将混凝土用作海洋环境建筑材料方面已有悠久的历史(图 1.3)。起初,混凝土主要用于港口结构。后来,混凝土作为建筑材料在其他方面的应用也越来越广泛,例如混凝土应用在海峡通道建设工程(Klinge, 1986; Krokeborg, 1990, 1994, 2001)。除了传统的桥梁(图 1.4)外,海峡通道建造方面还出现了一些新的结构形式,如浮桥(图 1.5, 图 1.6) (Meeas *et al.*, 1994; Hasselø, 2001)。甚至海底混凝土隧道也已成为详细研究和设计的主题,其中的一种设计方案如图 1.7 所示(Remseth, 1997; Remseth *et al.*, 1999)。



图 1.3 拥有众多峡湾和无数大大小小岛屿的挪威沿海，岸上和海上都有许多混凝土结构（来源：NOTEBY AS）

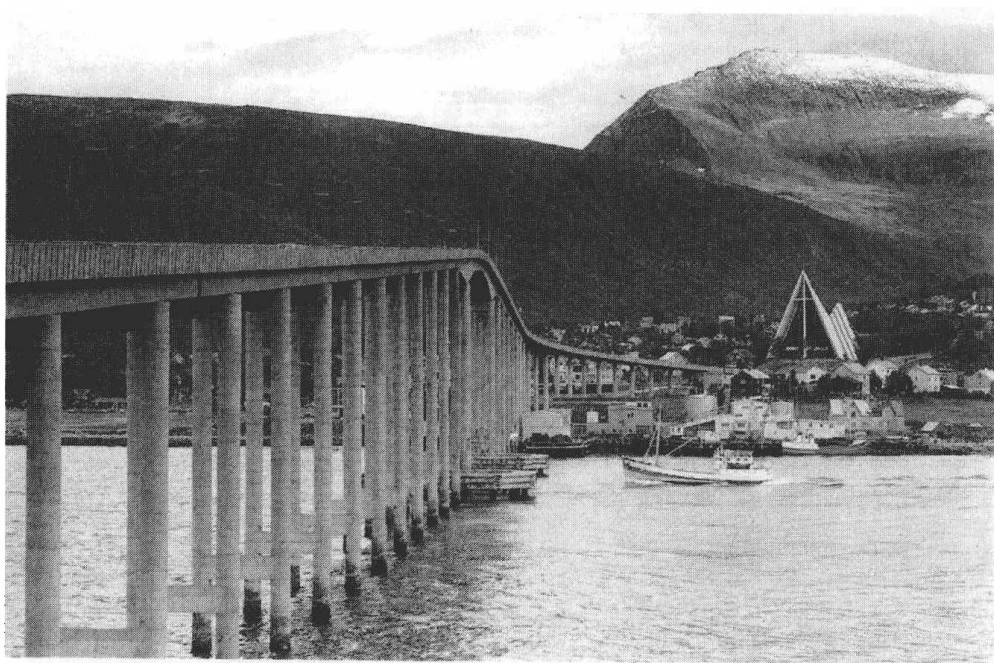


图 1.4 Tromsø (1960) 桥是一座全长 1016m 的
悬臂桥 (来源: Johan Brun)

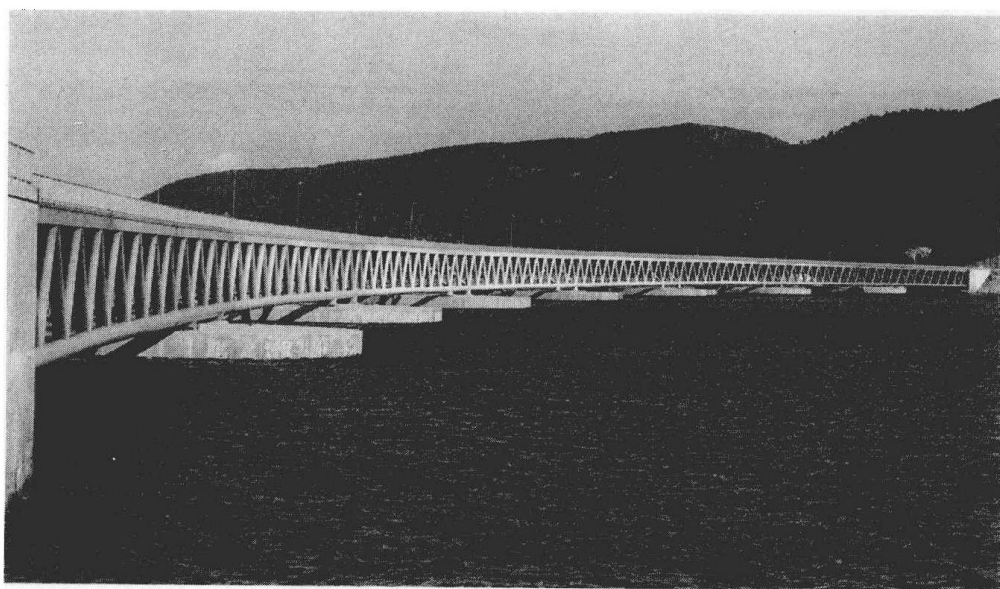


图 1.5 Bergsøysund 桥是一座全长 931m 的浮桥 (来源: Johan Brun)



图 1.6 Nordhordlands 桥是一座全长 1610m 的悬浮斜拉桥
(来源: Johan Brun)

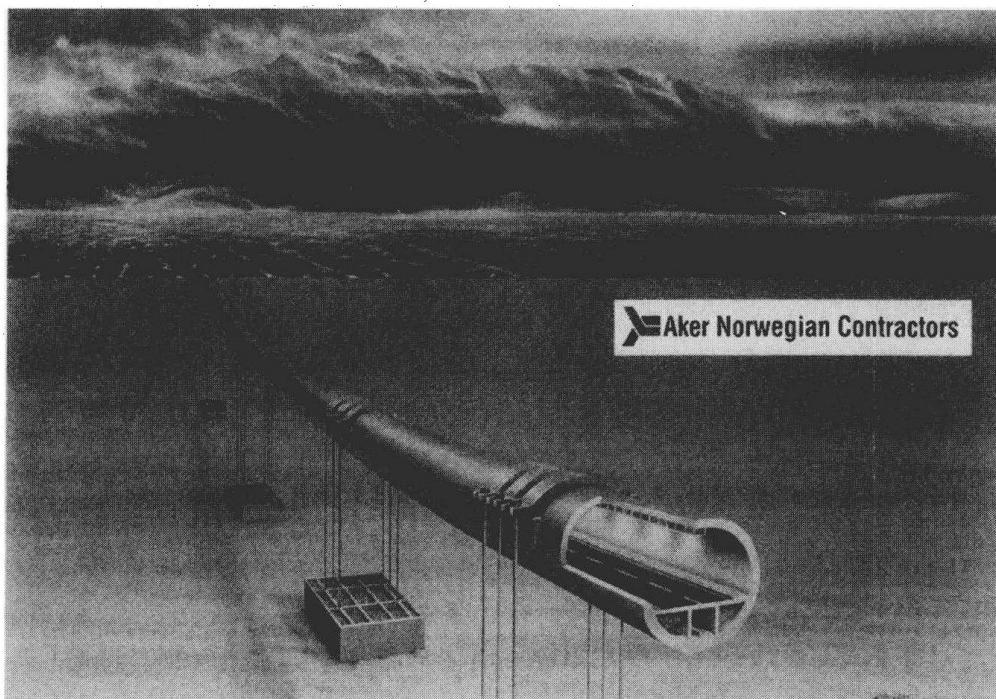


图 1.7 利用海底隧道作为海峡通道的设计方案之一
(来源: 挪威公路管理局)

自 1973 年以来, 北海地区共建造了 34 座重要的混凝土结构, 且大部分位于挪威境内。这些工程中, 超过 260 万 m^3 的高性能混凝土浇注量极大地促进